

온실내 수분제어를 위한 CFD 모델 개발

Development of CFD Model to Control Humidity in Greenhouse

김문기 · 김기성 · 권혁진*

Kim, M.K. · Kim, K.S. · Kwon, H.J.*

Dept. of Agricultural Eng., Seoul National University, Suwon, 441-744

서론

온실 내에서의 안정된 생산을 위하여 온도, 광, CO₂ 등의 환경 조절에 대한 연구는 지속적으로 수행되어 왔다. 그러나 온실 내부의 수분환경에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 온실 내부의 적정한 상대습도는 60-70%인데, 온실 내부가 건조해지거나 다습해지면 작물의 생육에 문제가 생긴다. 또한 습도 분포가 고르지 않을 경우 시설 내에서 생산되는 작물의 품질에 차이가 생기는 문제가 생긴다. 따라서 이를 해결하기 위한 적절한 장치의 개발과 효율적인 운영방안이 제시되어야 하는데, 본 연구에서는 가습과 제습같은 수분제어를 해석하기 위한 CFD 모델을 개발하여 적절한 수분 제어 장치의 이용 방안에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

가. CFD 시뮬레이션 모델의 개발

CFD 시뮬레이션을 위해 CFD해석 패키지인 Fluent (version 5.4)를 사용하였으며, 기하학적 요소 및 계산 영역의 요소 분할 등은 Gambit(version 1.3)을 이용하였다.

지배방정식은 유체해석을 위한 기본적인 3개의 방정식인 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식 이외에 난류의 해석을 위한 realizable k- ϵ 난류모델, 태양복사 및 복사 열전달의 해석을 위한 DO 복사모델, 포그분무 입자의 해석을 위한 Discrete Phase 모델을 추가로 이용하였다. 비선형 형태인 이들 미분방정식들을 선형화하기 위해서 분리

해석법(segregated solver)을 적용하고, 포그노즐이 분사하는 시간 중에는 비정상상태로 해석하였고, 제습장치에 의한 기류의 영향이 고려되어야 되므로 Gambit에서 3차원으로 격자를 구성하여 해석하였다.

시물레이션은 가습모델과 제습모델로 나누어 수행되었으며, 가습모델에서는 DPM 모델을 이용하여 포그시스템의 분무를 표현하였고, 제습모델에서는 제습기 유입부와 유출부의 절대습도의 차이를 이용하여 제습기 내에서 수분이 응축되는 것을 표현하였다.

2. 온실 실험

실험에 사용된 온실은 경기도 안성시 한경대학교 내에 위치한 단동 유리온실로 폭 6.5m, 길이 18m, 높이 4m이다. 온실 내부의 온도 및 상대습도는 그림 1의 오른쪽 그림과 같이 온실의 단면을 세 개로 나누어서 각 단면별로 그림 1의 왼쪽과 같이 온실의 상부와 중부, 하부에 온습도 겸용센서인 HOBO(H08-003-02, Onset computer Corp.)를 이용하여 10초간격으로 데이터를 저장하였고, 풍속은 온실 길이방향의 중앙 단면의 측창과 천창에 미풍속센서(Series640, Dwyer Instrument)를 설치하여 온실의 길이방향에 수직으로 불어오는 바람에 대하여 일방향 풍속(x-velocity)을 측정하였다. 미풍속 센서에 의해 측정된 데이터는 디지털 다점 기록계(HR2300, Yokogawa)를 이용하여 1분간격으로 저장하였다. 또한 외부 기상자료의 수집을 위해 미기상 수집장치(CR10x, Campbell)를 실험온실로부터 10m 떨어진 위치에 설치하여 외부 기상자료를 1분간격으로 저장하였다.

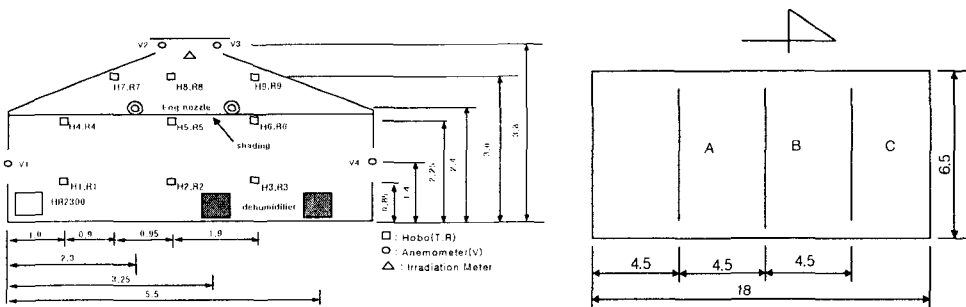


그림 1. 실험 온실의 단면 및 센서 배치도(좌: 단면도, 우: 평면도, 단위 : m)

포그 노즐은 온실 양쪽 측벽으로부터 2.3m, 온실 바닥으로부터 2.4m 위치에

설치된 2개의 급수라인에 1m간격으로 1개씩 총 32개가 배치되었다. 분무압은 $70\text{kg}/\text{cm}^2$ 였고, 분무입자의 크기는 $20\mu\text{m}$ 였다. 포그시스템 가동조건은 무차광의 경우 분무정지시간 45초에 분무시간 45초였다. 분사방향은 온실 바닥면에 수직방향 위로하였다. 제습장치는 온실의 중앙 단면부분인 B단면에 작업 통로가 있는 부분인 온실 좌측벽에서 각각 3.25m와 5.5m인 위치에 설치를 하였다. 제습장치는 일반적인 상업용 응축기의 형태인 Horizontal shell type 으로 설계하였으며, 냉매로는 지하수를 이용하였다.

온실 내 수분제어를 위한 CFD 모델의 검증

가. 입력자료의 선정

수분제어 해석을 위한 CFD 모델의 입력값을 살펴보면 표 1.과 같다. 입력자료는 실험으로 얻은 데이터를 이용하였다. 외부 기상자료의 선정은 일사량이 일정하게 유지되는 시점을 선택하였다.

표 1. 선정된 외부기상자료 및 입력값

입력값(단위)	가습	제습
외부온도(K)	303.85	302.78
외부습도(%)	58.9	54.9
외부일사(W/m^2)	678	853
외부풍속(m/s)	0.44	0.46
외부풍향(degree)	272.0	120.4
포화수증기압(Pa)	4430	4160
습구온도(K)	298.35	297.25
수온(K)	297.45	296
분무시간(sec)	45	45
정지시간(sec)	45	45
분무량(kg/sec)	0.00157	0.00157
분무입자크기(μm)	20	20

나. 실험과 시뮬레이션의 결과 비교

표 2는 가습 모델의 시뮬레이션에 대하여 온실 내부의 각 측정점별 상대습도에 대한 실측치와 예측치를 비교한 결과를 각각 나타낸 것이다. 각 측정점별로 습도는 0.1~14.0%의 오차를 나타내었다.

그림 2는 온실의 중앙단면에서 상대습도의 분포도를 실측치와 예측치에 대하여 비교

한 그림이다. 가습에 의하여 수분이 온실 하부에 몰리게 되어 온실 하부의 습도가 높게 나타나는 경향을 보였다. 온실 하부 단면의 습도 분포가 예측치와 실측치간 다소 차이가 있어 보이는데, 이는 포그시스템의 각 노즐별로 분사량이 차이가 생겨서 발생된 것으로 판단된다. 시뮬레이션에서는 노즐별로 동일한 양이 분사되는 것으로 표현하였기 때문에 온실 길이방향에 따른 습도변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 예측치와 실측치 모두 외부공기가 유입되는 좌측면에서 습도가 낮게 나타나고 우측으로 갈수록 습도가 높게 나타나는 것으로 나타나 시뮬레이션에 의하여 가습에 의한 온실 내부의 습도 분포 경향을 파악할 수 있는 것으로 판단된다.

표 2. 실측치와 예측치의 상대습도 비교(가습)

측점	A			B			C		
	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)
1	64.1	69.9	5.7(9.0)	60.3	69.9	9.6(15.9)	71.6	70.6	1.0(1.4)
2	74.0	72.9	1.1(1.4)	72.5	72.9	0.4(0.6)	77.4	73.0	4.4(5.7)
3	65.1	73.9	8.8(13.5)	72.5	73.8	1.3(1.8)	73.5	73.4	0.1(0.1)
4	53.5	60.5	7.0(13.1)	58.0	61.9	3.9(6.7)	61.1	63.9	2.7(4.4)
5	62.8	63.9	1.1(1.8)	66.1	68.6	2.5(3.9)	66.6	67.0	0.4(0.6)
6	61.5	62.9	1.5(2.4)	66.6	64.5	2.1(3.1)	55.2	62.7	7.4(13.5)
7	58.6	62.4	3.8(6.5)	63.3	63.2	0.1(0.2)	60.3	62.0	1.8(2.9)
8	76.2	62.2	14.0(18.4)	70.7	63.6	7.0(10.0)	67.6	61.8	5.7(8.5)
9				55.3	59.0	3.7(6.6)			

주) 오차항목에서 ()안의 값은 상대오차(%값)임.

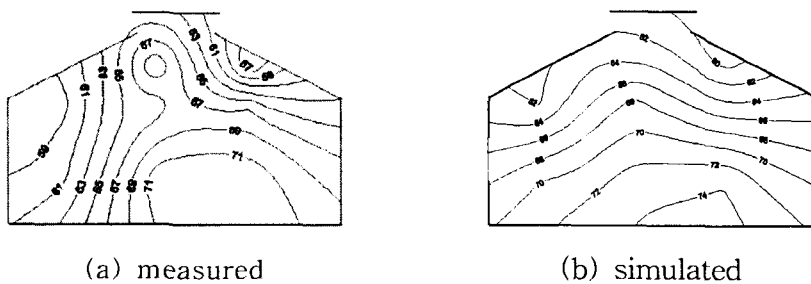


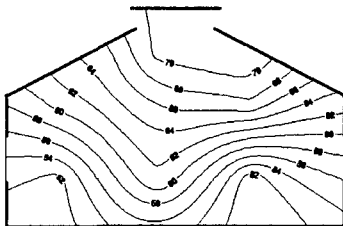
그림 2. 온실 B단면의 상대 습도 실측치와 예측치의 비교(가습)

표 3은 제습모델의 시뮬레이션에 대하여 온실 내부의 각 측정별 상대습도에 대한 실측치와 예측치를 비교한 결과를 각각 나타낸 것이다. 각 측정별로 습도는 1.0~11.3%의 오차를 나타내었다. 그림 3은 온실의 중앙단면에서 상대습도의 분포도를 실측치와 예측치에 대하여 비교한 그림이다. 중앙 단면의 그림을 비교해보면 실측치와 예측치 모두 제습기 설치되어 있는 부분의 온실의 하부에서 습도가 가장 낮게 나타나고 상부로 올라갈수록 습도가 점점 높아지는 것으로 나타났다. 따라서 제습모델도 온실 내부의 수분 분포 경향을 예측하는 것이 가능하리라 판단된다.

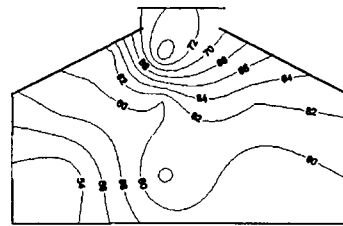
표 3. 실측치와 예측치의 상대습도 비교(제습)

측점	A			B			C		
	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)
1	68.3	74.4	6.1(8.9)	51.3	52.3	1.0(2.0)	58.4	62.8	4.4(7.6)
2	71.5	73.4	1.9(2.6)	61.7	69.5	7.8(12.6)	64.6	69.2	4.6(7.2)
3	59.7	66.7	7.0(11.7)	50.6	58.6	8.0(15.0)	62.1	60.1	2.0(3.3)
4	86.5	75.8	10.7(12.4)	60.8	58.2	2.6(4.2)	81.7	75.4	5.3(7.1)
5	78.1	73.0	5.1(6.6)	66.1	75.4	9.3(14.0)	79.3	72.2	7.1(8.3)
6	76.9	70.0	6.9(9.0)	67.7	56.7	11.0(16.2)	72.1	66.1	6.0(8.3)
7	76.0	66.1	9.9(13.0)	65.1	59.3	5.9(9.0)	67.9	65.3	2.6(3.4)
8	63.0	65.8	2.8(4.4)	70.3	59.9	10.4(4.8)	76.5	65.2	11.3(14.8)
9				71.4	62.1	9.3(11.2)			

주) 오차항목에서 ()안의 값은 상대오차(%)임.



(a) measured



(b) simulated

그림 3. 온실 B단면의 상대 습도 실측치와 예측치의 비교(제습)

요약 및 결론

제습이나 가습과 같은 온실 내부의 수분제어에 의한 온실 내부의 습도 분포변화를 CFD 모델에 의하여 시뮬레이션한 결과, 실측치와 예측치의 다소 차이는 있었다. 실측치와 예측치의 오차가 일어난 원인을 살펴보면, 실제 포그시스템에서는 수분이 분사될 때 최대 0.75m정도의 폭으로 퍼져서 분사가 되지만, CFD 모델에서 포그시스템의 분사를 예측하는 모델인 Discrete Phase 모델은 수분이 분사될 때 일직선으로 분사되는 것으로 표현하기 때문에 차이가 생긴 것으로 판단된다. 그리고, 시뮬레이션에서는 노즐의 분사량을 실험에 의한 평균값으로 하였으나, 실제로는 노즐별로 분사량의 차이가 나기 때문에 오차가 생긴 것으로 판단된다. 하지만, 분포면에서는 비슷한 경향을 나타내었다. 따라서, CFD 모델에 의하여 수분제어에 의한 온실 내부의 수분분포 경향을 예측하는 것이 가능하리라 판단된다.

참고 문헌

1. 김문기, 김기성, 남상운. 2001. 온실냉방시스템의 효율적 이용에 관한 연구. 농림부 최종보고서.
2. 김현수. CFD 시뮬레이션에 의한 온실포그냉방시스템의 냉방효과 예측. 서울대학교 대학원 석사학위논문.
3. 민의동. 1991. 열교환기의 이론과 설계. 창원출판사.
4. 윤남규. 2000. CFD 시뮬레이션에 의한 온실의 자연환기 및 공기유동 특성. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
5. 이인복, T. H. Short. 1999. CFD 시뮬레이션을 이용한 연동형 온실 내 자연환기의 효율성 분석. 생물환경조절학회지 8(1) : 9-18.
6. Al-helal, I. 1998. Computational fluid dynamics study of natural ventilation in arid region greenhouse. Ph. D. dissertation, the Ohio State University.